



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 41 22 697 A 1

51 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
H 01 J 37/28

21 Aktenzeichen: P 41 22 697.6  
22 Anmeldetag: 9. 7. 91  
43 Offenlegungstag: 16. 1. 92

DE 41 22 697 A 1

30 Unionspriorität: 32 33 31  
11.07.90 JP 2-181469 20.07.90 JP 2-191988

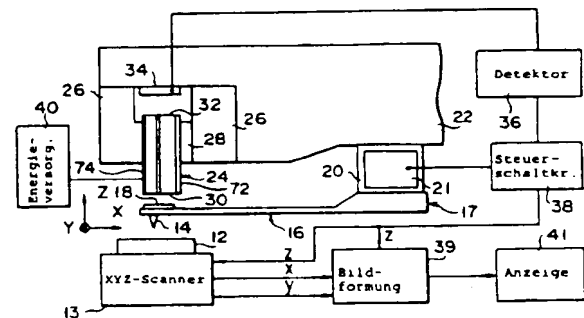
71 Anmelder:  
Olympus Optical Co., Ltd., Tokio/Tokyo, JP

74 Vertreter:  
Kuhnen, R., Dipl.-Ing.; Wacker, P., Dipl.-Ing.  
Dipl.-Wirtsch.-Ing.; Fürniß, P., Dipl.-Chem.  
Dr.rer.nat.; Brandl, F., Dipl.-Phys., Pat.-Anwälte;  
Hübner, H., Dipl.-Ing., Rechtsanw., 8050 Freising

72 Erfinder:  
Kajimura, Hiroshi, Tokio/Tokyo, JP; Okada, Takao,  
Hachioji, Tokio/Tokyo, JP

54 Atomsondenmikroskop

57 Ein Ausleger (16) eines Atomsondenmikroskops weist eine Sonde (14) auf einer Seite des Endbereiches und einen Spiegel (18) auf einer gegenüberliegenden Seite auf. Der Ausleger (16) ist an einem Stützteil (22) über ein piezoelektrisches Element (20) befestigt. Ein Halbleiterlaser (24) oberhalb des Spiegels (18) weist eine Reflexions-Spaltflächenebene (32) auf und bildet einen Fabry-Pérot-Resonator zwischen dem Spiegel (18) und der Spaltflächenebene (32). Der Ausgang vom Resonator ändert sich abhängig von dem Versetzungsbetrag des Endbereiches des Auslegers (16) und somit abhängig von der Oberflächenkonfiguration der Probe. Diese Variation wird von einem Detektor (36) über einen Fotodetektor (34) ermittelt. Ein Steuerschaltkreis (38) steuert eine Treiberspannung eines XYZ-Scanners (13), um die Variationen im Ausgang des Resonators aufzuheben, so daß die Distanz zwischen der Sondenspitze und der Probenoberfläche konstant bleibt. Die Treiberspannung liefert somit Höhendaten der Probenoberfläche. Die Treiberspannung wird zusammen mit einem Positionssignal bezüglich der Probenoberfläche von dem Scanner (13) einer Bildformungseinheit (39) zugeführt. Diese Bildformungseinheit (39) erzeugt ein dreidimensionales Bild der Probenoberfläche auf der Grundlage der Eingangsspannung und der Signale.



DE 41 22 697 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Atomsondenmikroskop nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. 2 bzw. 8 zur Beobachtung einer feinen Oberflächenkonfiguration einer Probe unter Verwendung einer angespitzten Sonde.

Bekannte Atomsondenmikroskopen sind Abtast-Tunnelmikroskope (STM = Scanning Tunneling Microscope), Atomkraftmikroskope (AFM = Atomic Force Microscope) und Magnetkraftmikroskope (MFM = Magnetic Force Microscope).

Das STM wurde im Jahre 1982 von Binnig, Rohrer, et al. vorgestellt. Es ist in der Lage, die Oberflächenkonfiguration einer elektrisch leitfähigen Probe im atomaren Größenbereich oder in der atomaren Größenordnung zu beobachten. Das STM wird im Detail in "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscope", G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber und E. Weibel, Physical Review Letters, Band 49, 57 (1982) beschrieben. Das STM weist eine elektrisch leitfähige Sonde auf, welche im Nahbereich der Oberfläche einer elektrisch leitfähigen Probe angeordnet ist. Die Sondenspitze wird der Probenoberfläche bis auf eine Distanz von 1 nm angenähert. An die Sonde und die Probe wird eine Spannung angelegt, welche einen Tunnelstrom verursacht. Der Tunnelstrom variiert abhängig von der Distanz zwischen Sonde und Probe. Wenn sich die Distanz um 0,1 nm verändert, wächst der Strom ungefähr um das zehnfache an oder nimmt auf ein Zehntel ab. Während der Untersuchung wird die Sonde entlang der Probenoberfläche bewegt, beispielsweise mittels einer sogenannten Rasterabtastung. Während die Sonde bewegt wird, wird die Distanz zwischen Sondenspitze und Probenoberfläche unter Verwendung eines feinbeweglichen Elementes, wie beispielsweise einem piezoelektrischen Stellglied kontrolliert, so daß die Intensität des Tunnelstromes zwischen Sonde und Probe auf einem konstanten Wert gehalten wird. Somit wird auch die Distanz zwischen Sonde und Probe konstant gehalten und die räumliche Ortskurve der Sondenspitze erzeugt ein Profil, welches parallel zur Probenoberfläche ist und somit die Oberflächenkonfiguration der Probe wiedergibt. Ein dreidimensionales Bild der Probenoberfläche kann somit auf der Grundlage von Positionsdaten erhalten werden, welche aus der dem piezoelektrischen Stellglied zugeführten Betriebsspannung berechenbar sind.

Das Atomkraftmikroskop (AFM) ist in der Lage, die Probenoberfläche einer isolierenden Probe im atomaren Größenbereich zu untersuchen. Das AFM ist im Detail in "Atomic Force Microscope", G. Binnig, C.F. Quate, Physical Review Letters, Band 56, 930 (1986) beschrieben. Beim AFM wird die Sonde durch einen relativ weichen Ausleger gehalten. Wenn die Sonde nahe der Probenoberfläche angeordnet wird, wirkt zwischen einem Atom in der Spitze der Sonde und einem Atom in der Probenoberfläche eine van der Waals'sche Anziehungskraft. Wenn nachfolgend die beiden Atome so nahe zusammengebracht werden, daß sie einander beinahe kontaktieren, entsteht aufgrund des Abstoßungsprinzips von Pauli zwischen den beiden Atomen eine Abstoßungskraft. Die Anziehungskraft und die Abstoßungskraft zwischen Atomen ist sehr gering und beträgt ungefähr  $10^{-7}$  bis  $10^{-12}$  (N). Wenn mit dem AFM eine Beobachtung durchgeführt wird, wird die Sonde der Probenoberfläche so nahe gebracht, daß der Ausleger aufgrund der zwischenatomaren Kräfte zwischen Sondenspitze und Probenoberfläche versetzt oder verbo-

gen wird. Wenn die Sonde entlang der Probenoberfläche bewegt wird, ändert sich die Distanz zwischen Sonde und Probenoberfläche abhängig von der Konfiguration der Probenoberfläche und demzufolge der Versetzungsbetrag des Auslegers. Diese Veränderungen in der Versetzung des Auslegers werden detektiert und eine Rückkopplungssteuerung wird unter Verwendung eines piezoelektrischen Stellgliedes oder dergleichen derart durchgeführt, daß der Versetzungsgrad des Auslegers den Anfangswert wieder annimmt. Im Ergebnis bewegt sich die Sondenspitze in einer gekrümmten Ebene parallel zur Probenoberfläche. Auf der Grundlage der dem piezoelektrischen Stellglied zugeführten Spannung kann ein Bild der Oberflächenkonfiguration der Probe erhalten werden.

Das Magnetkraftmikroskop (MFM) weist eine Sonde aus magnetischem Material auf. Die übrigen strukturellen Merkmale des MFM sind im wesentlichen gleich dem AFM. Wie das AFM wird beim MFM die Probenoberfläche abgetastet, während eine Magnetkraft zwischen magnetischen Partikeln der Probe und Sonde konstant gehalten wird, so daß ein dreidimensionales Bild der Oberflächenkonfiguration der Probe wiedergegeben werden kann.

Der Ausleger, der in dem AFM oder dem MFM verwendet wird, ist vorzugsweise langgestreckt und aus einem Material geringen Gewichts und hohem Elastizitätskoeffizienten, da der Ausleger mit hohem Ansprechverhalten auf geringe Kräfte (zwischenatomare Kräfte oder magnetische Kräfte) versetzt oder bewegt werden muß. Wenn jedoch die Länge des Auslegers anwächst, nimmt die Charakteristikfrequenz ab. Im Ergebnis wird das Ansprechverhalten oder die Empfindlichkeit auf die Oberflächenkonfiguration der Probe während des Abtastvorganges verschlechtert und das Entfernen von externem Vibrationsrauschen wird schwieriger. Für gewöhnlich ist die Länge des Auslegers auf 1000 µm und weniger begrenzt und die Charakteristikfrequenz wird auf 10 bis 100 KHz gesetzt. Der Versetzungsbetrag des Auslegers ist so begrenzt und hohe Versetzungsempfindlichkeit ist nötig.

Bei einer Möglichkeit, die Versetzung eines derartigen Auslegers zu detektieren, wird ein STM auf der rückwärtigen Seite (der Seite, auf der die Sonde nicht vorhanden ist) des Auslegers vorgesehen und die Versetzung des Auslegers oder Bewegung des Auslegers wird als Variation des Tunnelstroms detektiert. Ist hierbei der Ausleger elektrisch leitfähig, sind keine weiteren speziellen Behandlungen mehr nötig. Wenn jedoch der Ausleger elektrisch isolierend ist, ist die Oberfläche des Auslegers mit einem elektrisch leitfähigen Material, beispielsweise mittels eines chemischen Abscheideverfahrens überzogen. Das STM hat ausreichend Empfindlichkeit hinsichtlich der Distanz zwischen Sonde und Ausleger. Da jedoch eine zwischenatomare Kraft zwischen Sonde und Ausleger wirkt, kann eine hochexakte Messung nicht durchgeführt werden.

Bei einer anderen Möglichkeit ist eine optisch reflektierende Oberfläche auf der rückwärtigen Seite des Endabschnittes des Auslegers vorgesehen und ein Strahl von einem Rubin-Feststofflaser oder einem Argon-Gaslaser wird auf die reflektierende Oberfläche gerichtet. Ein Reflexionswinkel, der sich abhängig von der Versetzung des Auslegers ändert wird durch einen Lichtpositionsdetektor PSD (= Light Position Detector) erfaßt. Da bei diesem Verfahren jedoch der Einfallswinkel des Strahls erhöht wird, um die Empfindlichkeit zu verbessern, nimmt die Größe der gesamten Vorrich-

tung in nachteiliger Weise zu. Die Charakteristikfrequenz nimmt hierdurch ab und ebenfalls die Empfindlichkeit. Zusätzlich hat der auf die Auslegeroberfläche einfallende Strahl eine bestimmte Breite und um die Auflösung des Reflexionswinkels zu verbessern muß die Ebenheit der reflektierenden Oberfläche erhöht werden. Dies ist jedoch nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen.

Bei einem weiteren bekannten Verfahren wird das von dem Laser ausgehende Licht in einen Referenzstrahl und einen Detektionsstrahl aufgeteilt. Der Detektionsstrahl wird auf die optisch reflektierende Oberfläche am rückwärtigen Ende des Auslegers gerichtet. Ein von der Oberfläche reflektierter Strahl wird mit dem Referenzstrahl zur Interferenz gebracht und ein Interferenzausgang wird fotoelektrisch detektiert. Um gute Empfindlichkeit sicherzustellen, ist die Lichtpfadlänge des Referenzstrahls gleich dem des Detektionsstrahlsystems zu setzen, um umgebende Einflüsse (Temperaturänderungen, Schwankungen im Atmosphärendruck etc.) ausschließen zu können. Dies wiederum macht die gesamte Vorrichtung in nachteiliger Weise komplex. Wenn das Referenzstrahlensystem und das Detektionsstrahlensystem separat ausgebildet werden, ist es schwierig, die Charakteristikfrequenzen der jeweiligen Lichtpfade einander anzugleichen. Aufgrund von Umgebungseinflüssen wird hierdurch die Empfindlichkeit verschlechtert.

Bei dem Atomsondenmikroskop wird die Sonde relativ zu Probenoberfläche bewegt, um die Probenoberflächenkonfiguration feststellen zu können. Während dieser Bewegung wird die Sonde in Z-Richtung vertikal zur Probenoberfläche servogesteuert, um die Distanz zwischen Sonde und Probe konstant zu halten.

Beim STM wird die Servosteuerung der Sonde durch eine Rückkopplungssteuerung der Z-Achsenposition der Sonde durchgeführt, um den Tunnelstrom, der zwischen der Sonde und der leitfähigen Probe fließt, konstant zu halten. Wenn hierbei Staub auf der Probenoberfläche ist oder Teile der Probenoberfläche mit einem Oxidfilm bedeckt sind, nähert sich die Sonde der Probe an, wobei der Staub oder der Oxidfilm entfernt werden.

Sowohl beim AFM als auch beim STM bewegt sich die Sonde entlang der Probenoberfläche. Wenn ein Oxidfilm oder Staub oberhalb der Sondenspitze vorliegt, wird die Sonde einer Abscherkraft in X- oder Y-Richtung aufgrund des Oxidfilms oder dem Staub unterworfen. Es tritt dadurch ein Fehler zwischen der tatsächlichen Lage der Sondenspitze und der Lage auf, welche auf der Grundlage der dem piezoelektrischen Element zugeführten Spannung detektiert worden ist.

Demgegenüber ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Atomsondenmikroskop nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. 2 bzw. 8 auszubilden mit einem Detektionssystem kleiner Abmessungen, welches in der Lage ist, die Versetzung eines Auslegers aufgrund von schwachen Kräften mit hoher Empfindlichkeit und hoher Stabilität gegenüber umgebenden Einflüssen zu detektieren.

Die Lösung dieser Aufgabe erfolgt erfindungsgemäß durch die im Anspruch 1 bzw. 2 bzw. 8 angegebenen Merkmale.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den zugehörigen Unteransprüchen.

Weitere Einzelheiten, Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung unter Bezugnahme auf die Zeich-

nung.

Es zeigt:

Fig. 1 eine erste Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2 eine perspektivische Ansicht eines Halbleiterlasers in Fig. 1;

Fig. 3 ein Spektrum einer Mehrzahl von stehenden Wellen in einem Laserresonator;

Fig. 4 ein Oszillationsspektrum eines Einfachmoden-Lasers;

Fig. 5 die Strom/Ausgangscharakteristik eines Halbleiterlasers;

Fig. 6 die Ausgangscharakteristik eines Resonators des Typs Fabry-Perot zwischen einem Spiegel und einer Reflexions/Spaltungebene in Fig. 1;

Fig. 7 schematisch eine zweite Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 8 die Wellenlängen-Selektion eines Etalon in Fig. 7;

Fig. 9 schematisch eine dritte Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 10 eine vierte Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 11 eine fünfte Ausführungsform des Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 12 eine Darstellung der Größe des Auslegers in Fig. 1;

Fig. 13 eine Darstellung der Versetzung des Auslegers in Fig. 11 aufgrund von zwischenatomaren Kräften;

Fig. 14 die Darstellung der Drehversetzung des Auslegers von Fig. 11 aufgrund einer Scherkraft;

Fig. 15 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Informationsverarbeitung in der fünften Ausführungsform;

Fig. 16 in einer graphischen Darstellung die Beziehung zwischen der Sonden/Proben-Distanz und der zwischenatomaren Kraft zwischen Sonde und Probe;

Fig. 17 eine sechste Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 18 die Veranschaulichung des Lichtpfades zu dem Zeitpunkt, zu dem der Ausleger gemäß Fig. 17 um einen Winkel  $\Theta$  gedreht wurde;

Fig. 19 in perspektivischer Ansicht den Ausleger von Fig. 17;

Fig. 20 eine siebte Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops der vorliegenden Erfindung; und

Fig. 21 und 22 eine achte Ausführungsform eines Atomsondenmikroskops gemäß der vorliegenden Erfindung.

Gemäß Fig. 1 umfaßt das Mikroskop der ersten Ausführungsform einen Ausleger 16, der an einem seiner Enden eine Sonde 14 zur Abtastung der Oberfläche einer Probe 12 trägt. Der Ausleger 16 weist einen Bereich aus  $\text{SiO}_2$  (oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) mit einer Länge von 500 bis 2000  $\mu\text{m}$ , einer Dicke von 5  $\mu\text{m}$  und einer Breite von 200  $\mu\text{m}$  auf. Dieser Auslegertyp wird mittels einer Halbleiterfertigungstechnik hergestellt, welche unter der Bezeichnung "Mikrofabrikation" oder "Mikrobearbeitung" bekannt ist. Ein Beispiel einer derartigen Technik ist in dem Artikel "Silicon as Mechanical Material" von Kurt T. Peterson, Proceedings of the IEEE, Band 70, Nr. 5 Seiten 420 - 457, Mai 1982 beschrieben.

Auf einer oberen Oberfläche des Endabschnittes weist der Ausleger 16 einen Spiegel 18 auf. Der Spiegel 18 ist durch Abscheidung von Gold oder Silber gebildet.

Ein Stützbereich 17 des Auslegers 16 weist eine feste Struktur auf, um der Befestigung an dem Mikroskopgehäuse etc. widerstehen zu können. Beispielsweise wird derjenige Abschnitt des Substrates, welches durch die Mikrofabrikation nicht bearbeitet wurde als Stützbereich 17 verwendet. Der Stützbereich 17 des Auslegers 16 ist an einem Trägerteil 22 aus Silizium oder Pyrex unter Dazwischenschaltung eines piezoelektrischen Elementes 20 befestigt. Das piezoelektrische Element 20 weist zwei einander gegenüberliegende Elektroden 21 auf, von denen nur eine in Fig. 1 dargestellt ist. Abhängig von einer an die Elektroden 21 angelegten Spannung ist der Ausleger 16 in Z-Richtung bewegbar. Oberhalb des Spiegels 18 ist ein Halbleiterlaser 24 angeordnet. Der Halbleiterlaser 24 weist zwei einander gegenüberliegende Elektroden 72 und 74 auf. Eine der Elektroden (Elektrode 74) ist direkt an einer Wärmesenke 26 aus beispielsweise Kupfer angeordnet, welche an dem Trägerteil 22 befestigt ist. Die andere Elektrode 72 ist an der Wärmesenke 26 über einen Silikongummi 28 befestigt. Der Halbleiterlaser 24 weist eine Doppel-Hetero-Struktur auf und erzeugt vorteilhafterweise schwachen Ausgang bei schwachem Schwellenwert.

Ein hierfür geeigneter Halbleiterlaser wird nachfolgend näher unter Bezug auf Fig. 2 beschrieben. Fig. 2 zeigt einen Halbleiterlaser mit einer Doppel-Hetero-Struktur. Gemäß Fig. 2 sind auf einer (001)-Ebene eines GaAs-Substrates 60 des n-Typs die nachfolgenden Schichten aufeinanderfolgend aufgebracht: eine GaAs n-Typ Pufferschicht 62, eine  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}_{0,5}$  n-Typ Plättierungsschicht 64, eine  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  p-Typ Aktivschicht 66, eine  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  p-Typ Plättierungsschicht 68 und eine streifenförmige GaAs n-Typ Blockierschicht 70. Diese Schichten werden beispielsweise durch ein Epitaxial-Verfahren aufgebracht. In Kontakt mit der Schicht 70 ist eine p-Typ Ohm'sche Elektrode 72 in Streifenform aufgebracht. In Kontakt mit dem GaAs-Substrat 60 ist eine n-Typ Ohm'sche Elektrode 74 angeordnet.

Der Halbleiterlaser weist zwei parallele Spaltungsebenen (cleavage planes) in Form von (110)-Ebenen mit einer Distanz von 100 bis 300  $\mu\text{m}$  auf. Zwischen diesen Schichten oder Ebenen (Reflektorschichten) wird ein Resonator des Fabry-Perot Typs gebildet. Wenn den Ohm'schen Elektroden eine Spannung oberhalb eines Schwellenwertes zugeführt wird, wird durch Re-Kopplung von injizierten Elektronen Licht emittiert. Das Licht bewegt sich zwischen den beiden parallelen reflektierenden Oberflächen hin und her. Während das Licht durch stimulierte Emission verstärkt wird, wird ein Teil des auf die reflektierenden Oberflächen auftretenden Lichtes absorbiert (Absorptionsverlust). Der Lichtverlust und die Leistung aufgrund der stimulierten Emission werden ausbalanciert und eine Oszillation beginnt. Das in dem Laserresonator hin- und hergeworfene Licht erzeugt eine stehende Welle mit einer Stirnfläche parallel zu und in Phase mit den reflektierenden Oberflächen. Durch eine partielle Lichttransmission durch die reflektierenden Oberfläche wird ein Ausgang erzeugt. Bei einem Laserresonator mit einer Resonatorlänge oberhalb der Wellenlänge kann eine Anzahl von etwas unterschiedlichen Wellenlängen resoniert werden.

Fig. 3 zeigt ein Spektrum von stehenden Wellen in dem Laserresonator. Die Länge L des Laserresonators gibt sich durch  $L = q\lambda/2n_{eq}(q = \text{eine ganze Zahl})$ , wobei  $\lambda$  gleich die Wellenlänge des Lichtes ist und  $n_{eq}$  ein Äquivalenz-Refraktionsindex eines Wellenleiters ist. Wenn  $\lambda = 0,85\mu\text{m}$ ,  $n_{eq} = 3,5$  und  $L = 300\mu\text{m}$  ist, hat die

stehende Welle einen Knoten bei  $qL/2470 - 1$ . Es sei angenommen, daß ein Strom nicht unterhalb eines Schwellenwertes ( $I_{th1}$ ,  $I_{th2}$ ) einer Strom/Ausgangscharakteristik gemäß Fig. 5 dem Doppel-Hetero-Struktur Halbleiterlaser mit einer schmalen aktiven Schicht und einer reduzierten Oszillation im Horizontal/Lateral-Modus zugeführt wird. In diesem Falle arbeitet der Laser gemäß Fig. 4 als Single-Moden-Laser, der nur in einem Mittenspektrum oszilliert. Die Breite dieses Spektrums ist sehr gering und liegt bei ungefähr 1/3 bis 1/6 der vertikalen Modendistanz  $\Delta\mu$  (0,3–2 nm). Der Ausgang nimmt abrupt bei einer Wellenlängenverschiebung von ungefähr 0,2 bis 0,8 Å ab.

Ein typischer Laser zur Verwendung für optische Kommunikation ist ein DFB-Laser (Distribution Feedback Laser), bei dem eine Gitternetzmarkierung oder ein Grating in einem aktiven Bereich oder einer aktiven Region vorgesehen ist, oder ein DBR-Laser (Distribution Reflection Laser), bei dem die Gitternetzmarkierung auf einer oder beiden Seiten der aktiven Region vorgesehen ist. Diese Laser werden unter Berücksichtigung der Lichtverteilung in Fasern verwendet und sie sind in der Lage, eine stabile Single-Moden-Oszillation durchzuführen. Bei diesem Lasertyp wird die Oszillationswellenlänge durch den Zyklus der Gitternetzmarkierung oder des Gratings bestimmt. Somit kann eine Single-Moden-Oszillation stabil durchgeführt werden. Bei einem Halbleiterlaser für Kommunikation wird ein hoher elektrischer Strom eingebracht, um einen hohen Ausgang zu erhalten. Folglich wird eine hohe Energiemenge in Wärme umgesetzt und nicht in Licht, was zu einem Anstieg der Temperatur des Lasers führt. Im Fabry-Perot-Modus ist der Brechungsindex der aktiven Region variabel aufgrund eines Temperaturanstieges und die Wellenlänge ändert sich in einem Bereich von 0,6 bis 0,8 Å pro Grad bei einem GaAs/AlGaAs-Laser und in einem Bereich von 1,0 Å pro Grad bei einem GaInAsP/InP-Laser. Durch Anheben der Ausgangsleistung wird somit der Laser instabil.

Bei dem Halbleiterlaser 24 gemäß der ersten Ausführungsform ist die Spaltungsebene (durchlässige Spaltungsebene) 30, welche näher an dem Spiegel 18 ist mit einem Antireflexionsfilm aus  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bedeckt und die Spaltungsebene (reflektierende Spaltungsebene) 32, welche vom Spiegel 18 beabstandet ist, ist mit einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Film beschichtet. Diese Ebenen 30 und 32 und der Spiegel 18 sind parallel zueinander angeordnet und durch den Spiegel 18, die Ebene 32 und den Wellenleiter wird ein Fabry-Perot-Resonator gebildet. Wenn ein elektrischer Strom oberhalb eines Schwellenwertes in den Resonator eingebracht wird, wird von der Ebene 32 ein Laserstrahl mit bestimmter Frequenz ausgegeben. Ein Fotodetektor 34 zur Erfassung eines Laserstrahls aus dem Laser 24 ist oberhalb der Ebene 32 angeordnet. Der Fotodetektor 34 ist beispielsweise eine hochempfindliche PIN-Fotodiode aus einem Material mit Empfindlichkeit entsprechend der Wellenlänge des Laserstrahls.

Wenn auf die Sonde 14 keine Kraft aufgebracht wird, liegt der Spiegel 18 parallel zur Ebene 32 und der Resonator zeigt eine Ausgangscharakteristik  $T_0$  gemäß Fig. 6. Wenn ein elektrischer Strom mit einer Amplitude  $E_d$  und einer Frequenz  $f_d$  von einer Energiequelle 40 dem Laser 24 zugeführt wird, wird ein Laserstrahl mit einer Maximalamplitude  $P_{\text{max}}$  von dem Fotodetektor 34 erfaßt. Wenn sich die Sonde 14 der Probe 12 nähert, beginnt eine zwischenatomare Kraft zu wirken. In diesem Fall bewegt sich der Spitzenbereich des Auslegers

16 in Richtung des Halbleiterlasers 24 und der Spiegel 18 und die Ebene 32 werden nicht-parallel. Die Lichtmenge in dem Resonator nimmt somit ab. Im Ergebnis ändert sich die effektive Ausgangscharakteristik, wie in Fig. 6 durch die Kurve  $T_1$  dargestellt und die Maximalamplitude des Laserstrahls, die von dem Fotodetektor 34 erfaßt wird, nimmt von  $P_{\max}$  auf  $P_2$  ab. Demzufolge erzeugt der Fotodetektor 34 ein Signal entsprechend der zwischenatomaren Kraft zwischen der Sonde 14 und der Probe 12, d. h., entsprechend der Versetzung oder Verbiegung des Auslegers 16. Die Amplitudenvariation (Ausgang) des Lasers kann durch Überwachung des Erregerstroms mittels eines Stromüberwachungselementes innerhalb des Halbleiterlasers detektiert werden. Das Überwachungselement hier ist einer aus zwei Halbleiterlasern, die in Serie geschaltet sind, oder es sind Diodendetektoren auf einem Halbleitersubstrat.

Vor dem Meßvorgang wird die zwischenatomare Kraft, welche zwischen der Sonde 14 und der Probe 12 wirkt so gesetzt, daß sie eine Anziehungskraft  $F_{\text{attraktiv}} = F_{A0}$  oder eine Abstoßungskraft  $F_{\text{repulsive}} = F_{R0}$  ist, abhängig vom Probenotyp.

Der Ausleger 16 wird durch die festgesetzte zwischenatomare Kraft versetzt oder bewegt. Die dem piezoelektrischen Element 20 zugeführte Spannung wird durch einen Steuerschaltkreis 38 gesteuert, um eine vorherbestimmte Ausgangsamplitude  $P_2$  zu erhalten, wodurch die Distanz zwischen dem Spiegel 18 und der reflektierenden Schicht oder Ebene 32 eingestellt wird.

Während des Meßvorganges wird die Sonde 14 durch eine in der Zeichnung nicht dargestellte Z-Antriebsvorrichtung der Probe 12 angenähert. Die Z-Antriebsvorrichtung wird in einer Position angehalten, wo der oben erwähnte vorherbestimmte Ausgangsamplitudenwert  $P_2$  erhalten wird. In diesem Zustand werden Sonde 14 und Probe 12 relativ durch einen bekannten XYZ-Scanner 13 (z. B. einem zylindrischen Scanner) bewegt, wodurch die Sonde 14 die Oberfläche (XY-Oberfläche) der Probe abtastet. Die Distanz zwischen Sonde 14 und Probe 12 ändert sich abhängig von der Probenoberflächenkonfiguration und der Ausgang von dem Fotodetektor 34 ändert sich ebenfalls. Der Ausgang des Fotodetektors 34 wird einem Detektor 36 eingegeben, so daß Variationen im Ausgang des Fotodetektors 34 erfaßt werden können. Eine bestimmte Servospannung wird von dem Steuerschaltkreis 38 dem Scanner 13 zugeführt, um Variationen im Ausgang des Fotodetektors 34 aufzuheben. Während des Abtastvorganges wird die dem Scanner 13 zugeführte Spannung von dem Steuerschaltkreis 38 erzeugt. Das Ausgangssignal (Z-Signal) vom Steuerschaltkreis 38, welches Höhendaten der Probenoberfläche anzeigt, wird einem Bildformungsschaltkreis oder einer Bildformungseinheit zugeführt. Diese Bildformungseinheit 39 verarbeitet die Höhendaten (Z-Signal) entsprechend der Probenoberfläche und Positionssignale (X und Y-Signal) entsprechend der Lage der Probenoberfläche von dem Scanner 13. Somit erzeugt die Bildformungseinheit 39 ein dreidimensionales Bild der Probenoberflächenkonfiguration. Dieses Bild wird dann auf einer Anzeige 41 sichtbar gemacht.

Fig. 7 zeigt schematisch eine zweite Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Aufbau dieser zweiten Ausführungsform entspricht im wesentlichen demjenigen der ersten Ausführungsform mit der Ausnahme, daß ein sogenannter Etalon 42 vorgesehen und eingestellt ist, eine Laserwellenlänge  $\lambda_0$  selektiv durchzulassen. Der Etalon 42 ist zwischen der reflektierenden Ebene 32 und dem Detektor 34 vorgesehen.

Der Etalon 42 ist bekannt als Wellenlängen-Selektionsfilter. Der Etalon 42 umfaßt zwei Spiegel mit gleichem Reflexionsvermögen, welche präzise zueinander parallel ausgerichtet sind. Wenn sich die Reflektivität 100% annähert, nimmt die Lichtintensität ab. Die Wellenlänge des übertragenen Lichtes wird durch den Einfallswinkel in den Etalon gesteuert. Der Etalon 42 kann durch Aufeinanderlaminieren von dampfabgeschiedenen Dünnschichten aufgebaut sein.

Die Vorrichtung gemäß der zweiten Ausführungsform ist geeignet insbesondere dann, wenn die zwischenatomaren Kräfte zwischen Sonde 14 und Probe 12 als Anziehungskraft auftreten, die schwächer ist als eine Abstoßungskraft. Mit anderen Worten, wenn die zwischenatomare Kraft zwischen Sonde 14 und Probe 12 die Anziehungskraft ist, ist die Distanzvariation zwischen Sonde und Probe relativ zu einer Änderung der zwischenatomaren Kraft gering. Daher ist auch die Versetzung des Auslegers 16 gering im Vergleich zu der Versetzung bei einer Abstoßungskraft. Demzufolge wird die Parallelität zwischen Spiegel 18 und reflektierender Ebene 32 nicht wesentlich gestört und die Variationen in der Laserausgangscharakteristik sind gering. Da jedoch der Etalon 42 eine steile Wellenlängen-Selektionscharakteristik hat, wie in Fig. 8 dargestellt, kann Licht einer Wellenlänge  $\lambda_0$  mit im wesentlichen keiner Dämpfung hindurchlaufen, wenn Spiegel 18 und reflektierende Ebene 32 parallel sind. Wenn jedoch die Wellenlänge von  $\lambda_0$  abweicht, nimmt die Intensität von hindurchgelassenem Licht schlagartig ab. Somit kann in dem Fall, in dem die Parallelität zwischen Spiegel 18 und reflektierende Ebene 32 nicht wesentlich verändert wird, die Versetzung des Auslegers 16 durch den Fotodetektor 34 mit gleicher Präzision detektiert werden. Wie in der ersten Ausführungsform wird der Ausgang vom Fotodetektor 34 über den Detektor 36 dem Steuerschaltkreis 38 zugeführt. Somit wird die Distanz zwischen Sondenspitze und Probenoberfläche gesteuert und ein Bild der Oberflächenkonfiguration der Probe wird durch die Bildformungseinheit 39 auf der Grundlage des Ausgangssignals (Z-Signal) vom Steuerschaltkreis 38 und der X- und Y-Signale vom Scanner erzeugt. Dieses Bild wird dann der Anzeige 41 zugeführt.

Eine dritte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird nachfolgend erläutert. Gemäß Fig. 9 ist in der dritten Ausführungsform die reflektierende Ebene 32 am Halbleiterlaser 24 durch ein sogenanntes Bragg-Grating 44 ersetzt.

Bei einem Halbleiterlaser ist ein Fabry-Perot-Reflexionsspiegel mit zwei Spaltungsebenen ein Wellenlängen-Selektionsfilter. Wenn eine zyklische Struktur (Bragg-Grating 44) einer Teilung P kleiner als eine Distanz L zwischen den beiden Ebenen entlang des Lichtpfades angeordnet ist, wird der Brechungsindex des Wellenleiters periodisch und äquivalent moduliert. Nur derjenige Teil des durchgelassenen Lichtes, der eine Wellenlänge hat, die auf die Teilung P der Bragg-Wellenlänge abgestimmt ist, wird in einer Richtung umgekehrt zur Lichtfortpflanzungsrichtung reflektiert; dies erfolgt nach dem gleichen Prinzip, nach dem Elektronenwellen in einem Kristall gestreut werden. Somit kann ein Reflexionselement oder Transmissionsfilter mit einer Spektralbreite erhalten werden, die kleiner ist als im Falle der Fabry-Perot-Interferenz. Die Reflektivität oder Durchlässigkeit des Reflexionselementes wird durch den Schnittwinkel bestimmt.

Ähnlich dem Etalon 42 bei der zweiten Ausführungsform hat das Bragg-Grating 44 eine steile Wellenlängen-

genselektionscharakteristik und bildet einen Reflexionspiegel mit bestimmtem Reflexionsvermögen. Somit kann ein Atomkraftmikroskop geschaffen werden, welches für den Fall geeignet ist, in dem eine Anziehungskraft zwischen der Sonde 14 und der Probe 12 wirkt. Die Arbeitsweise dieses Mikroskopes entspricht derjenigen der zweiten Ausführungsform und eine nochmalige Beschreibung hiervon erfolgt nicht.

Fig. 10 zeigt den Aufbau einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Bei dieser vierten Ausführungsform ist der Halbleiterlaser 24 am Endabschnitt des Auslegers 16 angeordnet. Der Ausleger 16 weist einen Wellenleiter 46 zum Führen von Licht von dem Laser 24 zu einem Spitzenbereich des Auslegers auf, wobei ein herkömmliches Gittermarkierungs-Reflexionselement 48 (grating reflection element) für ein vertikales reflektierendes Licht von dem Wellenleiter 46 an der Spitze des Auslegers 16 angeordnet ist. Parallel zu dem Element 48 ist ein Spiegel 50 angeordnet. Der Spiegel 50 ist auf einem Träger 52 befestigt, der auch das piezoelektrische Element 20 trägt.

Licht von dem Halbleiterlaser 24 durchläuft den Wellenleiter 46 und erreicht das reflektierende Element 48. Hier wird das Licht reflektiert und dem Spiegel 50 zugeleitet. Die Distanz zwischen dem Element 48 und dem Spiegel 50 beträgt einige  $\mu\text{m}$ . Der Spiegel 50 reflektiert das Licht noch einmal und das von dem Spiegel 50 kommende Licht läuft durch das Reflexionselement 48 und den Wellenleiter 46 zu der Reflexionsebene 32. Im Ergebnis wird zwischen der Ebene 32 und dem Spiegel 50 ein Fabry-Perot-Resonator gebildet. Der Fotodetektor 34 erfaßt die Versetzung der Sonde 14 als eine Variation in der Lichtintensität von der Reflexionsebene 32. Wie in der ersten Ausführungsform wird der Ausgang vom Fotodetektor 34 über den Detektor 36 dem Steuerschaltkreis 38 zugeführt. Die Distanz zwischen der Sonde 38 und der Probenoberfläche wird gesteuert und auf der Grundlage des Ausgangssignals (Z-Signal) vom Steuerschaltkreis 38 und dem X-Signal und Y-Signal vom Scanner 13 erzeugt die Bildformungseinheit 39 ein Bild der Probenoberfläche. Dieses Bild wird der Anzeige 41 zugeführt.

Nachfolgend wird eine fünfte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Atomsondenmikroskopes beschrieben. Gemäß Fig. 11 weist ein Ausleger 112 an den oberen und unteren Oberflächen seines Spitzen-Endbereiches eine Sonde 114 bzw. einen Spiegel 116 auf. Das andere Ende des Auslegers 112 ist an einem oberen Siliziumsubstrat 118 befestigt. Das obere Siliziumsubstrat 118 ist über einen Zwischenblock 120 mit U-förmigem Querschnitt mit einem unteren Siliziumsubstrat 122 verbunden. Das untere Substrat 122 umfaßt einen Halbleiterlaser 124 und einen Wellenleiter 126. Der Laser 124 wird mittels eines Halbleiterherstellungsverfahrens hergestellt. Der Wellenleiter 126 weist an einem seiner Enden einen Bragg-Reflektor oder ein Prisma auf und dient dazu, einen Laserstrahl vom Laser 124 in einem bestimmten Winkel abzustrahlen. Der Wellenleiter 126 ist beispielsweise durch wiederholte Abscheidungs- und Ätzprozesse aus dem Siliziumsubstrat 122 herausgeformt. Der vom Wellenleiter 126 abgegebene Laserstrahl wird von dem Reflexionspiegel 116 am Ausleger 112 reflektiert. Der vom Spiegel 116 reflektierte Strahl wird durch eine erste Reflexionsoberfläche 128 auf dem unteren Siliziumsubstrat 122 erneut reflektiert und nachfolgend von einer zweiten Reflexionsoberfläche 130 an dem Zwischenblock 120 reflektiert. Schließlich fällt der Strahl auf einen Fotodetektor 132 auf dem un-

teren Siliziumsubstrat 122.

Wenn der Ausleger 112 durch eine Kraft  $F$  um einen Betrag  $\delta$  versetzt wird, wie in Fig. 12 dargestellt, ist die Versetzung  $\delta$  durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\delta = 4 l^3 F / t w^3 E \quad (1)$$

wobei  $l$  die Länge des Auslegers 112 ist,  $t$  die Dicke des Auslegers ist,  $w$  die Breite des Auslegers ist und  $E$  der vertikale Elastizitätskoeffizient des Auslegers ist.

Wenn der Ausleger 112 um  $\delta$  versetzt wird, verändert sich die Lage des Hauptlaserstrahls auf dem Fotodetektor 132 um den Betrag  $\Delta y$ . In Fig. 13a ist mit "a" eine Distanz zwischen dem proximalen Ende des Auslegers 112 und der Lage der Sonde 114 bezeichnet, mit "b" die Länge eines Lichtpfades in einer YZ-Ebene zwischen dem Spiegel 116 und der ersten Oberfläche 128, mit "c" die Länge eines Lichtpfades zwischen der ersten Reflexionsoberfläche 128 und der zweiten Reflexionsoberfläche 130 und mit "d" die Länge eines Lichtpfades zwischen der zweiten Reflexionsoberfläche 130 und dem Fotodetektor 132. Der Bewegungsbetrag  $\Delta y$  und die Distanz und die Längen a, b, c und d haben untereinander die folgende Beziehung:

$$\delta y a \delta (a + b + c + d) / a.$$

Wenn der Ausleger 112 um  $\Theta$  durch eine Momentenlast  $t$  gedreht wird, ergibt sich der Winkel  $\Theta$  als

$$\Theta = 3 l t / t w^3 G \quad (2)$$

wobei  $G$  der laterale Elastizitätskoeffizient des Auslegers 112 ist. Wenn der Ausleger 112 um  $\Theta$  dreht, verschiebt sich die Lage des Hauptstrahls auf dem Fotodetektor 132 entsprechend um  $\Delta x$ . Unter Bezug auf Fig. 14 ergibt sich der Bewegungsbetrag  $\Delta x$  als

$$\Delta x = \sin 2\Theta (g + h + i) \quad (3)$$

wobei  $g$  die Länge des Lichtpfades in der XZ-Ebene zwischen dem Spiegel 116 und der ersten Reflexionsoberfläche 128 ist,  $h$  die Länge des Lichtpfades zwischen der ersten Reflexionsoberfläche 128 und der zweiten Reflexionsoberfläche 130 ist und  $i$  die Länge des Lichtpfades zwischen der zweiten Reflexionsoberfläche 130 und dem Fotodetektor 132 ist.

Die Bewegungsbeträge  $\Delta x$   $\Delta y$  werden durch den Fotodetektor 132 erfaßt.

Der Fotodetektor 132 weist vier lichtempfangende Bereiche D1, D2, D3 und D4 auf, welche Signale  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  und  $d_4$  erzeugen. Wie aus Fig. 15 hervorgeht, sind herkömmliche Addierer und Subtrahierer miteinander kombiniert, um Signale  $S\delta$  und  $S\Theta$  zu erzeugen, welche sich wie folgt ergeben:

$$S\delta = (d_1 + d_2) - (d_3 + d_4) \quad (3)$$

$$S\Theta = (d_1 - d_2) + (d_3 - d_4) \quad (4)$$

Die Signale  $S\delta$  und  $S\Theta$  sind proportional zu  $\delta y$  und  $\Delta x$ . Demzufolge lassen sich die Versetzung  $\delta$  und der Drehwinkel  $\Theta$  des Auslegers 112 auf der Grundlage der Signale  $S\delta$  und  $S\Theta$  ermitteln. Diese Signale  $S\delta$  und  $S\Theta$  werden zusammen mit Positionssignalen (X-Signal und Y-Signal) von einem XY-Scanner 131 einer Bildformungseinheit 133 zugeführt und dort analysiert, um ein Bild der Probenoberflächenkonfiguration zu erzeugen. Das von der Einheit 133 erzeugte Bild wird anschließend auf einer Anzeige 135 sichtbar gemacht.

Der Fotodetektor 132 ist derart angeordnet, daß  $S\delta = 0$  ausgegeben wird, wenn der Ausleger 112 beispielsweise um  $\delta_0$  versetzt wird. Mit anderen Worten, während des Herstellungsprozesses wird die Beziehung zwischen der zwischenatomaren Kraft und der Sonden/Proben-Distanz berücksichtigt, wie in Fig. 16 dargestellt. Beispielsweise läßt sich die Versetzung  $\delta_0$  für den verwendeten Ausleger 112 vorab unter Verwendung der Gleichung (1) in Relation zu der Kraft ermitteln, die in einer Distanz A wirkt. Somit wird der Fotodetektor 132 in einer derartigen Lage angeordnet, daß  $S\delta = 0$  ausgegeben wird, wenn der Ausleger 112 um  $\delta_0$  versetzt wird.

Nachfolgend wird der Meßvorgang mit dem bisher beschriebenen Aufbau erläutert. Wenn der Meßvorgang durchgeführt wird, wird die gesamte Vorrichtung mittels eines nicht dargestellten Grobstellmechanismus in Z-Richtung bewegt. Dieser Grobstellmechanismus ist an dem unteren Siliziumsubstrat 122 vorgesehen. Hierdurch wird die Sonde 114 an dem Ausleger 112 an die Probe 134 herangebracht. Wenn die Sonde 114 an die Probe 134 herangebracht worden ist, wird von dem Halbleiterlaser ein Laserstrahl emittiert. Wenn der Ausgang  $S\delta$  zu Null geworden ist, wird das Annähern der Sonde 114 angehalten. Im Ergebnis wird der Ausleger 112 in dem Zustand angehalten, in dem er um  $\delta_0$  versetzt ist.

Nachfolgend wird die gesamte Vorrichtung 110 durch den Scanner 131 in XY-Richtung bewegt, so daß die Sonde 114 die Oberfläche der Probe 134 abtasten kann. Wenn die Sonde 114 bewegt wird, ändert sich die Distanz zwischen der Sonde 114 und der Probe 134 abhängig von der Oberflächenkonfiguration der Probe 134 und die zwischenatomaren Kräfte, welche auf die Sonde 114 einwirken ändern sich ebenfalls entsprechend. Im Ergebnis ändert sich die Versetzung des Auslegers 112 von  $\delta_0$  weg. Wie oben erläutert worden ist, verändert die Versetzung des Auslegers 112 einen Reflexionswinkel  $\beta$  des Laserstrahls vom Laser 124 am Reflexionsspiegel 116. Die Versetzung des Auslegers 112 wird als Ausgangssignal  $S\delta$  vom Fotodetektor 132 detektiert und ergibt sich aus den Gleichungen (1) und (3). Wenn eine Scherkraft auf die Sonde 114 wirkt, wird der Ausleger 112 in einer Drehrichtung versetzt. Der Drehwinkel des Auslegers 112 wird als Ausgangssignal  $S\theta$  vom Fotodetektor ermittelt und ergibt sich aus den Gleichungen (2) und (4). Die Signale  $S\delta$  und  $S\theta$ , sowie die Ausgangssignale (X-Signal und Y-Signal) vom Scanner 131, welche die momentane Lage auf der Oberfläche der Probe 134 anzeigen, werden der Bildformungseinheit 133 zugeführt. Ein Bild entsprechend der Oberflächenkonfiguration der Probe 134 wird somit erzeugt. Dieses erzeugte Bild wird nachfolgend auf der Anzeige 135 sichtbar gemacht.

Bei dieser Ausführungsform ist die Sonde 114 dafür ausgelegt, innerhalb eines Bereiches der Anziehungskraft zu arbeiten. Somit wird der Ausleger 112 normalerweise versetzt, wenn die Unebenheiten der Probenoberfläche in einem Bereich von  $\pm 2$  nm um die Lage A herum liegen. Wenn die Sonde 114 von der Probe 134 um 0,8 nm oder mehr entfernt ist, hält der Ausleger 112 in einer Parallellage und wird nicht versetzt. Wenn die Sonde 114 sich der Probe auf einen Abstand von 0,5 nm oder weniger genähert hat, entspricht die Sonden/Proben-Distanz nicht exakt der zwischenatomaren Kraft.

Die Fig. 17 bis 19 zeigen eine sechste Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Atomsondenmikroskopes. Bei der sechsten Ausführungsform ist das untere

Siliziumsubstrat 122 unter Zwischenschaltung eines piezoelektrischen Stellgliedes 136 mit einer Grobstellvorrichtung 138 verbunden. Das piezoelektrische Stellglied 136 ist in bekannter Weise ein Stellglied für Feinbewegungen in Z-Richtung. In einem Lichtpfad eines Laserstrahls von dem Halbleiterlaser 124 ist ein Drehspiegel 140 angeordnet. Der Spiegel 140 dreht um die Y-Achse und hat eine Spiegeloberfläche, die bezüglich einer Ebene vertikal zu Y-Achse leicht geneigt ist. Weiterhin ist an dem unteren Siliziumsubstrat 122 eine Feinbewegungs-Antriebsvorrichtung 144 mit einer in Y-Richtung beweglichen Stufe 142 angeordnet. An der Stufe 142 ist ein Fotodetektor 132 befestigt, wobei die Stufe 142 im wesentlichen auf gleicher Höhe mit der oberen Oberfläche des unteren Siliziumsubstrates 122 liegt.

Der Ausleger 112 in dieser Ausführungsform weist gemäß Fig. 19 zwei Paare von Zweielementkristallen 144A und 144B auf, welche sich in Längsrichtung erstrecken. Typen dieser Zweielementkristalle 144A und 144B sind von C. F. Quate et al. der Stanford University vorgeschlagen worden und sind bereits in einem STM-Ausleger zum Einsatz gelangt.

Aufbau und Arbeitsweise der Zweielementkristalle werden nun unter Bezug auf Fig. 19 beschrieben. Die Zweielementkristalle 144A und 144B werden in der nachfolgenden Art und Weise hergestellt: Aluminiumelektroden 146 zur Masselegung sind an den oberen und unteren Oberflächen des Auslegers 112 ausgebildet. Piezoelektrische Schichten 148 aus ZnO oder dergleichen sind durch Abscheidung auf den oberen und unteren Oberflächen der Aluminiumelektrode 146 ausgebildet. Weitere Aluminiumelektroden 150a, 150b, 150c und 150d für Antriebszwecke, welche mittig geteilt sind, sind auf den oberen und unteren Oberflächen der piezoelektrischen Schichten 148 angeordnet. In dieser Struktur ist ein Zweielementkristall 144A zwischen den Elektroden 150a und 150d angeordnet und der andere Zweielementkristall 144B liegt zwischen den Elektroden 150b und 150c.

Die von den Elektroden 150a bis 150d bedeckten piezoelektrischen Schichten 148 haben die Bezugszeichen 148a bis 148d. Die Schichten 148a bis 148d haben Längen 1a, 1b, 1c und 1d. Wenn Spannungen  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_1$  und  $V_2$  ( $V_1 > V_2$ ) den Elektroden 150a, 150b, 150c und 150d zugeführt werden, werden die Längen der piezoelektrischen Schichten zu  $1a=1c > 1b=1d$ . Im Ergebnis wölbt sich der Zweielementkristall 144A nach unten und der Kristall 144B wölbt sich nach oben und die Spitze des Auslegers 112 dreht sich um die Achse Q in Uhrzeigerichtung. Wenn die Spannungsintensitäten umgekehrt werden, d. h. wenn  $V_1 < V_2$  wird, dreht sich der Ausleger 112 entgegen Uhrzeigersinn. Nachfolgend werden diese Drehmodussteuerungen als "CW-Modussteuerung" und "ACW-Modussteuerung" bezeichnet (CW = clockwise = im Uhrzeigersinn und AC = anticlockwise = gegen Uhrzeigersinn).

Wenn andererseits Spannungen  $V_1$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  und  $V_2$  ( $V_1 > V_2$ ) den Elektroden 150a bis 150d zugeführt werden, ergeben sich die Längen der piezoelektrischen Schichten als  $1a=1b > 1c=1d$  und der Spitzenbereich des Auslegers 112 bewegt sich nach unten. Wenn die Spannungsintensitäten umgekehrt werden, d. h.

wenn  $V_1 < V_2$  wird, wölbt sich der Spitzenbereich des Auslegers 112 nach oben. Diese Versetzungsmodussteuerungen werden nachfolgend als "OBEN-Steuerung" und "UNTEN-Steuerung" bezeichnet.

Unter Bezug auf die Fig. 17 und 18 wird nachfolgend die Arbeitsweise der Vorrichtung näher beschrieben.



Vor dem Meßvorgang werden der Fotodetektor 132 und der Drehspiegel 140 in bestimmten Ausgangslagen angeordnet. Genauer gesagt, der Fotodetektor 132 wird mittels der feinarbeitenden Stellvorrichtung 143 in eine derartige Lage gebracht, daß der Ausgang S8 zu Null wird, wenn die Sonden/Proben-Distanz den Wert im Punkt C gemäß Fig. 16 annimmt und der Ausleger 112 um  $\delta_0$  versetzt wird. Diese Positionierung wird auf der Grundlage einer bestimmten Skalierung (nicht dargestellt) durchgeführt. Zusätzlich wird der Winkel des Drehspiegels 140 auf der Grundlage einer vorherbestimmten Skalierung (nicht dargestellt) bestimmt, so daß der Ausgang S0 vom Fotodetektor 132 zu Null wird, wenn die Sonde 114 von der Probe 134 eine Scherkraft  $T_0$  aufnimmt und der Ausleger 112 um  $\Theta_0$  dreht.

Im Meßvorgang wird die Sonde 114 an der Spitze des Auslegers 112 zusammen mit dem unteren Siliziumsubstrat 122 durch die Grobstellvorrichtung 138 an dem piezoelektrischen Stellglied 136 in Richtung auf die Probe 134 zugefahren. Während sich die Sonde 114 der Probe 134 nähert, wird der Ausgang S8 vom Fotodetektor 132 überwacht und wenn der Ausgang S6 zu Null geworden ist, wird die Grobstellvorrichtung 138 angehalten. In diesem Fall wirkt eine Abstoßungskraft entsprechend dem Punkt C in Fig. 16 auf die Sonde 114 und der Ausleger 112 verschiebt sich um  $\delta_0$  nach unten.

Nachfolgend wird die Sonde 114 mittels einer herkömmlichen XY-Abtastvorrichtung (nicht dargestellt) bewegt. Die Sonden/Proben-Distanz ändert sich abhängig von der Oberflächenkonfiguration der Probe 134. Demzufolge ändert sich die zwischenatomare Kraft, welche auf die Sonde 114 wirkt und somit auch der Versetzungsbetrag des Auslegers 112. Wenn sich der Versetzungsbetrag des Auslegers 112 verändert, wird auch der Punkt, auf dem der Laserstrahl den Fotodetektor 132 berührt verändert, so daß ein Ausgang S8 ( $\neq 0$ ) erzeugt wird. Der Ausgang S8 wird einem Z-Servoschaltkreis (nicht dargestellt) eingegeben. Der Ausgang von diesem Servoschaltkreis wird dem piezoelektrischen Stellglied 136 eingegeben, um eine Servosteuerung durchzuführen, so daß die Versetzung  $\delta_0$  konstant gehalten wird. Infolge dessen wird ein Bild der Oberflächenkonfiguration der Probe 134 auf der Basis des Ausgangssignals vom Z-Servoschaltkreis gebildet.

Während des Abtastens nimmt die Sonde 114 eine Scherkraft T von der Probe 134 auf und der Ausleger 112 wird verdreht. Die Drehversetzung des Auslegers 112 wird als Ausgang S0 vom Fotodetektor 132 erfaßt. Dieser Ausgang S0 wird initialisiert, um den Wert "0" zu haben, wenn die Sonde 114 die Scherkraft  $T_0$  aufnimmt. Wenn demzufolge die Scherkraft einen Wert hat, der von  $T_0$  unterschiedlich ist und wenn diese Scherkraft auf die Sonde 114 wirkt, wird der Ausgang S0 ( $\neq 0$ ) erzeugt. Dieses Signal S8 wird einem nicht dargestellten  $\Theta$ -Servoschaltkreis eingegeben, der mit den Zweielementkristallen 144A und 144B in Verbindung steht.

In dieser Ausführungsform wird der Betriebsbereich der Sonde 114 auf den Bereich der Abstoßungskraft gesetzt; er kann jedoch auch auf den Bereich der Anziehungskraft gesetzt werden. Da zusätzlich die Versetzung des Auslegers 112 servogesteuert in Z-Richtung auf den Wert  $\delta_0$  hin ist, kann der Ausleger 112 in einem weiten Bereich arbeiten. Weiterhin ist es möglich, im Initialisierungsprozeß den Drehspiegel 140 so zu justieren, daß der Ausgang S8 auf Null gesetzt wird, indem die Zweielementkristalle 144A und 144B vorher in dem Rotationsmodus gesteuert werden und indem die Sonde 114 so gedreht und festgelegt wird, daß die seitliche

Oberfläche der Sonde 114 vertikal zur Probenoberfläche steht.

Unter Bezug auf Fig. 20 und im Vergleich zur sechsten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben.

Der Ausleger 112 weist zwei Zweielementkristalle 152 und 154 auf, welche sich in Längsrichtung erstrecken. Jeder Zweielementkristall 152 und 154 weist einen Aufbau gemäß Fig. 19 auf. Jeder der Zweielementkristalle ist mit einem in der Zeichnung nicht dargestellten Treiberschaltkreis zur Steuerung des Verbiegungsmodus verbunden. Einer der Treiberschaltkreise weist einen Eingang Id zur Steuerung des Reflexionswinkels vom Reflexionsspiegel 116 am Ausleger 112 und einen Eingang It für die Drehmodussteuerung auf. Der andere Treiberschaltkreis weist einen Eingang Ic zur Durchführung der UNTEN-Steuerung um einen Grad entsprechend dem Grad der OBEN-Steuerung auf, der an dem einen Treiberschaltkreis durchgeführt wird. Der Eingang Ic ist mit dem Ausgang S6 des Fotodetektors 132 verbunden. Während der Reflexionswinkel des Spiegels 116 konstant gehalten wird, wird die Sonde 114 in Z-Richtung bewegt. Der Eingang It ist mit dem Ausgang S0 des Fotodetektors 132 über den bereits erwähnten  $\Theta$ -Servoschaltkreis verbunden. Ein Teil des unteren Substrates 122, welches unterhalb der Sonde 114 liegt ist mit einer Öffnung 156 versehen, was es möglich macht, die Probe unter Verwendung eines optischen Linsensystems optisch zu untersuchen.

Die Arbeitsweise dieser Ausführungsform wird nachfolgend erläutert. Wenn die Sonde 114 der Probe 134 unter Verwendung einer nicht dargestellten Grobstellvorrichtung angenähert wird, beginnt eine zwischenatomare Kraft zwischen der Sonde 114 und der Probe 134 zu wirken. Der Ausleger 112 wird beispielsweise um den Betrag  $\delta_0$  nach oben versetzt und der Fotodetektor 132 gibt das Signal S6 aus. Zu dieser Zeit wird die Grobstellvorrichtung angehalten. Danach wird die Sonde 114 mittels einer nicht dargestellten XY-Abtastvorrichtung in XY-Richtung bewegt und die Z-Servosteuerung wird durchgeführt. Wenn die Sonde 114 bewegt wird und die Distanz zwischen der Sonde 114 und der Oberfläche der Probe 134 abnimmt, wächst die Anziehungskraft, welche auf die Sonde 114 wirkt an und der Ausleger 112 wird weiter nach oben versetzt. Der Zweielementkristall 152 wird der UNTEN-Steuerung unterworfen und der Zweielementkristall 154 wird der OBEN-Steuerung unterworfen. Somit wird der Reflexionswinkel des Reflexionsspiegels auf den Originalwinkel zurückgestellt und die zwischenatomare Kraft, welche auf die Sonde 114 wirkt, wird auf einen vorbestimmten Wert gehalten. Wenn andererseits eine Scherkraft T von der Probe 134 ausgeübt wird, wird der Ausgang S0 dem Eingang Id über den  $\Theta$ -Servosteuerungsschaltkreis zugeführt, so daß dieser Treiberschaltkreis die Drehmodussteuerung durchführt. Wenn der Startpunkt der Servosteuerung abhängig von einer bestimmten zwischenatomaren Kraft gesetzt wird, welche auf den Ausleger 112 wirkt, erzeugen der Z-Servoschaltkreis und der  $\Theta$ -Servoschaltkreis Daten, welche die Konfiguration der Probe 134 und die Scherkraft anzeigen, wenn eine bestimmte zwischenatomare Kraft wirkt.

Unter Bezug auf die Fig. 21 und 22 wird nachfolgend eine achte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben. In den Fig. 21 und 22 ist mit dem Bezugszeichen 158 ein in bekannter Weise aufgebauter zylindrischer piezoelektrischer Stellantrieb bezeichnet, der an dem unteren Siliziumsubstrat 122 angeordnet ist.



Ein Teil der Seitenwand des Stellantriebs 158 ist mit einer Öffnung 160 versehen, durch welche ein Laserstrahl eintreten kann. Der Zwischenblock 120 mit dem Fotodetektor 132 ist innerhalb des Stellantriebs 158 angeordnet. Der Ausleger 112 mit der Sonde 114 und dem Reflexionsspiegel 116 an seinem Endabschnitt ist an dem oberen Siliziumsubstrat 118 angeordnet, welches wiederum an einem oberen Bereich des Stellantriebs 148 angeordnet ist.

Der piezoelektrische Stellantrieb 158 weist an seiner inneren Wand eine gemeinsame Elektrode auf und eine an seiner äußeren Wand angeordnete Elektrode ist in vier Teilbereiche entlang der Längsachse des Stellantriebs 158 unterteilt. Der Ausleger 112 kann in die  $\Theta$ -Richtung, die Y-Richtung und die Z-Richtung mittels einer bekannten Elektrodenspannung-Anlegemethode versetzt oder bewegt werden. Diese Funktion entspricht im wesentlichen der Funktion der Zweielementkristalle 144A und 144B und dem piezoelektrischen Stellglied 136 in der soeben beschriebenen Ausführungsform. Der zylindrische piezoelektrische Stelltrieb 158 kann auch durch vier stab- oder plattenförmige Stellantriebe ersetzt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung ist eine Mehrzahl von Abwandlungen möglich, auf welche hier noch kurz eingegangen werden soll. So ist beispielsweise das Material des Auslegers nicht auf Silizium beschränkt und andere geeignete Materialien können hierfür jeweils abhängig von den gewünschten Einsatzzwecken gewählt werden. In den beschriebenen Ausführungsformen wurde der Ausleger durch Ätzen eines Silizium-Wafers hergestellt; alternativ hierzu kann der Ausleger beispielsweise aus  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Polysilizium oder Aluminium hergestellt werden, indem Filmabscheidetechniken, wie beispielsweise CVD, Dampfabscheidung oder Sputtern mit Ätztechniken kombiniert werden.

Alternativ hierzu kann eine ausreichend dünne Folie aus Phosphorbronze, welche auf bekannte Art und Weise hergestellt werden kann verwendet werden. In diesem Fall kann die Sonde durch Aufbringen von Wolfram, Indium, Platin oder von Diamantpartikeln gebildet werden.

Weiterhin erfolgte die Beschreibung der vorliegenden Erfindung in den Ausführungsformen unter Bezug auf Atomkraftmikroskope. Die vorliegende Erfindung ist jedoch genauso gut auf andere Sondenmikroskope anwendbar, beispielsweise auf Magnetkraftmikroskope oder Tunnelmikroskope.

#### Patentansprüche

1. Atomsondenmikroskop mit:  
einer Sonde (14) mit einer punktförmigen Spitze;  
einem Ausleger (16), der die Sonde (14) an einem seiner Enden trägt;  
Distanzdetektionsvorrichtungen zur Detektion einer Distanz zwischen der Spitze der Sonde und der Oberfläche einer Probe (12);  
Bewegungsvorrichtungen (13) zur Bewegung der Sonde und der Probe relativ zueinander, um es der Sonde zu ermöglichen, die Oberfläche der Probe abzutasten;  
Bildformungsvorrichtungen (39) zur Formung eines Bildes der Oberfläche der Probe (12) auf der Grundlage eines Ausgangs von den Distanzdetektionsvorrichtungen und den Bewegungsvorrichtungen; und

Anzeigevorrichtungen (41) zur Anzeige des erzeugten Bildes, dadurch gekennzeichnet, daß das Mikroskop weiterhin aufweist:

ein Reflexionselement (18) an dem Endbereich des Auslegers (16), der gegenüber dem Endbereich liegt, an welchem sich die Sonde (14) befindet;  
einen Halbleiterlaser (24), der so angeordnet ist, daß ein Fabry-Perot-Resonator zwischen dem Reflexionselement (18) und den Reflexionsvorrichtungen (32, 44) gebildet wird, wobei die Distanzdetektionsvorrichtungen eine Distanz zwischen der Spitze der Sonde und der Oberfläche der Probe auf der Grundlage eines Ausgangs von dem Halbleiterlaser (24) detektieren.

2. Atomsondenmikroskop mit:

einer Sonde (14) mit einer punktförmigen Spitze;  
einem Ausleger (16), der die Sonde (14) an einem seiner Enden trägt;

Distanzdetektionsvorrichtungen zur Detektion einer Distanz zwischen der Spitze der Sonde und der Oberfläche einer Probe (12);

Bewegungsvorrichtungen (13) zur Bewegung der Sonde und der Probe relativ zueinander, um es der Sonde zu ermöglichen, die Oberfläche der Probe abzutasten;

Bildformungsvorrichtungen (39) zur Formung eines Bildes der Oberfläche der Probe (12) auf der Grundlage eines Ausgangs von den Distanzdetektionsvorrichtungen und den Bewegungsvorrichtungen; und

Anzeigevorrichtungen (41) zur Anzeige des erzeugten Bildes, dadurch gekennzeichnet, daß das Mikroskop weiterhin aufweist:

ein Drahtnetzreflektorelement (48) an dem Endbereich des Auslegers (16), der gegenüber dem Endbereich ist, an dem sich die Sonde (14) befindet;  
einen optischen Wellenleiter (46), der über den Ausleger verläuft und benachbart dem Drahtnetzreflektorelement (48) ist.

ein Reflexionselement (50) gegenüber und benachbart dem Drahtnetzreflektorelement (48); und  
einen Halbleiterlaser (24) mit Reflexionsvorrichtungen (32), welche optisch mit dem Wellenleiterpfad (46) gekoppelt sind, wobei ein Fabry-Perot-Resonator zwischen dem Reflexionselement (50) und den Reflexionsvorrichtungen (32) gebildet ist, wobei die Distanzdetektionsvorrichtungen eine Distanz zwischen der Spitze der Sonde und der Oberfläche der Probe auf der Grundlage eines Ausgangs von dem Halbleiterlaser (24) detektieren.

3. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Reflexionsvorrichtungen aus einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Film (32) bestehen, der in einer Spaltflächenebene des Halbleiterlasers angeordnet ist.

4. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Reflexionsvorrichtungen ein Bragg-Grating (44) aufweisen, welches optisch an eine Spaltflächenebene des Halbleiterlasers gekoppelt ist.

5. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Distanzdetektionsvorrichtungen Variationsdetektionsvorrichtungen (34, 36) zum Detektieren einer Variation im Ausgang des Halbleiterlasers und Steuervorrichtungen (20, 38) aufweisen zur Steuerung der Distanz zwischen der Sondenspitze und der Probenoberfläche abhängig von dieser Variation.

6. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Variationsdetektionsvorrichtungen (34, 36) einen Fotodetektor (34) zum Empfang von Licht von dem Halbleiterlaser und einen Detektor (36) zum Empfang des Ausgangs vom Fotodetektor aufweisen und daß die Steuervorrichtungen (20, 38) ein piezoelektrisches Element (20), welches den Ausleger trägt und einen Steuerschaltkreis (38) aufweisen zum Empfang des Ausgangs vom Detektor und zur Steuerung des piezoelektrischen Elementes derart, daß die Variationen in dem Ausgang vom Halbleiterlaser aufgehoben werden.

7. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß:  
die Reflexionsvorrichtungen aus einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Film (32) bestehen, der auf einer Spaltebenenfläche des Halbleiterlasers gebildet ist;

die Distanzdetektionsvorrichtungen Variationsdetektionsvorrichtungen zur Detektion einer Variation im Ausgang vom Halbleiterlaser (24) und Steuervorrichtungen aufweisen zur Steuerung der Distanz zwischen der Sondenspitze und der Probenoberfläche abhängig von den Variationen im Ausgang des Halbleiterlasers (24);

die Variationsdetektionsvorrichtungen einen Fotodetektor (34) zum Empfang von Licht von dem Halbleiterlaser (24) und einen Detektor (36) zum Empfang des Ausgangs vom Fotodetektor (34) aufweisen;

die Steuervorrichtungen ein piezoelektrisches Element zur Einstellung der Distanz zwischen der Sondenspitze und der Probenoberfläche und einen Steuerschaltkreis (38) aufweisen zum Empfang des Ausgangs von dem Detektor (36) und zur Steuerung des piezoelektrischen Elementes derart, daß Variationen im Ausgang des Halbleiterlasers (24) aufgehoben werden, wobei ein Etalon (42) zum selektiven Durchlassen von Licht einer speziellen Wellenlänge zwischen dem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Film (32) und dem Fotodetektor (34) angeordnet ist.

8. Atomsondenmikroskop mit:  
einer Sonde (114) mit einer punktförmigen Spitze;  
einem Ausleger (116), der die Sonde (114) an einem seiner Enden trägt;

Distanzdetektionsvorrichtungen zur Detektion einer Distanz zwischen der Spitze der Sonde und der Oberfläche einer Probe (134);

Bewegungsvorrichtungen (131) zur Bewegung der Sonde (114) und der Probe (134) relativ zueinander, um es der Sonde zu ermöglichen, die Oberfläche der Probe abzutasten;

Bildformungsvorrichtungen (133) zur Formung eines Bildes der Oberfläche der Probe (134) auf der Grundlage eines Ausgangs von den Distanzdetektionsvorrichtungen und den Bewegungsvorrichtungen; und

Anzeigevorrichtungen (135) zur Anzeige des erzeugten Bildes, dadurch gekennzeichnet,

daß das Mikroskop weiterhin aufweist:  
eine Reflexionsoberfläche (116) an dem Endbereich des Auslegers, der gegenüber dem Endbereich liegt, an dem die Sonde (114) angeordnet ist;

eine Lichtquelle (124) zur Abgabe eines Laserstrahls;

Beleuchtungsvorrichtungen (126) zum Richten des Laserstrahls von der Lichtquelle auf die Reflexions-

oberfläche;

Detektionsvorrichtungen zum Empfang des Laserstrahls, der von der Reflexionsoberfläche (116) reflektiert wurde und zum Detektieren des Bewegungsbetrages und der Drehung der Reflexionsoberfläche (116); und

Berechnungsvorrichtungen zur Erzeugung von Daten bezüglich der Oberflächenkonfiguration der Probe und der Scherkraft, welche auf die Sonde wirkt auf der Grundlage des Ausgangs von den Detektionsvorrichtungen.

9. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektionsvorrichtungen einen Fotodetektor (132) mit vier lichtempfangenden Bereichen in einer Matrix und Vorrichtungen zum Berechnen des Ausgangs von den lichtempfangenden Bereichen aufweisen.

10. Atomsondenmikroskop nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnungsvorrichtungen die Ausgänge von den lichtempfangenden Bereichen, welche zu derselben Reihe bezüglich von zwei Reihen gehören addiert und eine Subtraktion an den addierten Ergebnissen der beiden Reihen durchführt und weiterhin die Ausgänge von den lichtempfangenden Bereichen, welche zu der gleichen Spalte bezüglich der zwei Spalten gehören addiert und eine Subtraktion an den addierten Ergebnissen der beiden Spalten durchführt.

Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen

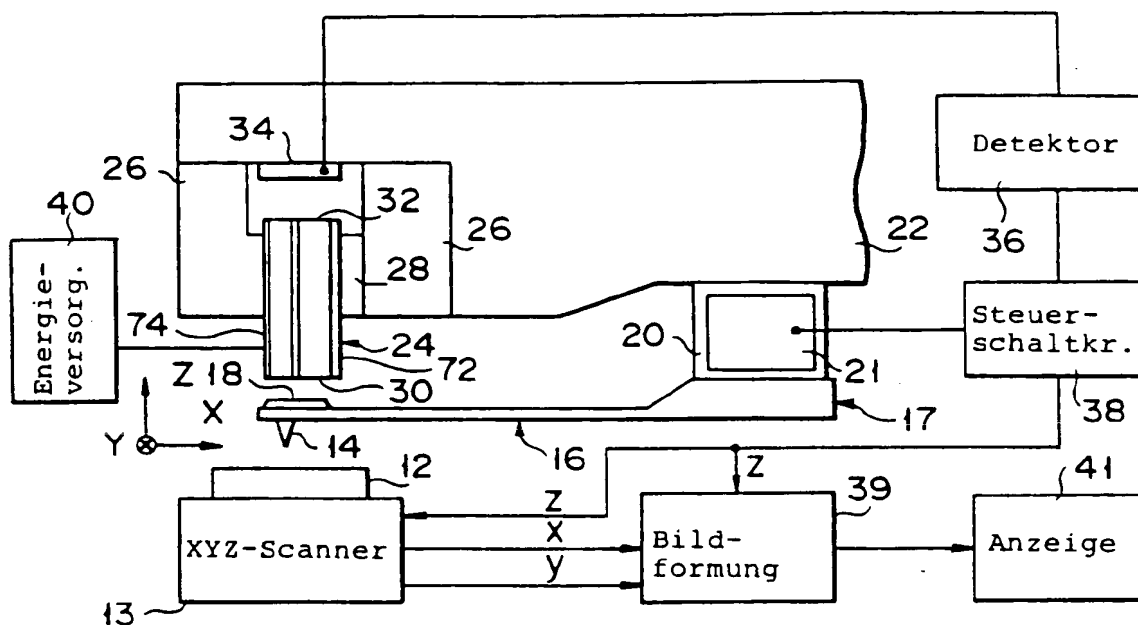


FIG. 1

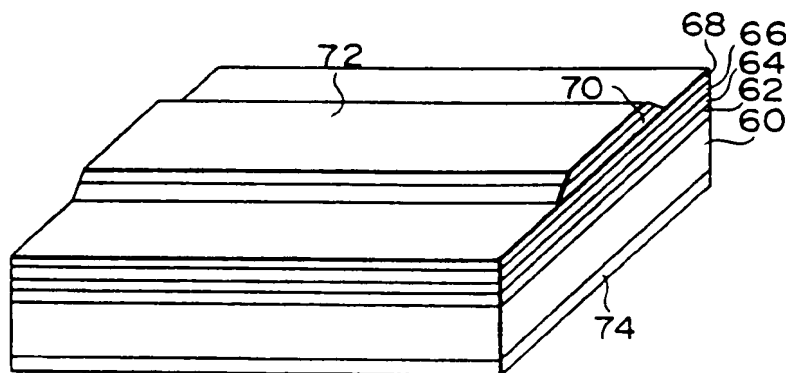


FIG. 2

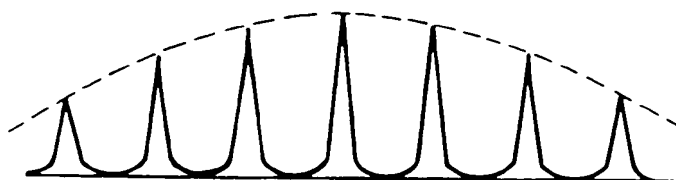


FIG. 3

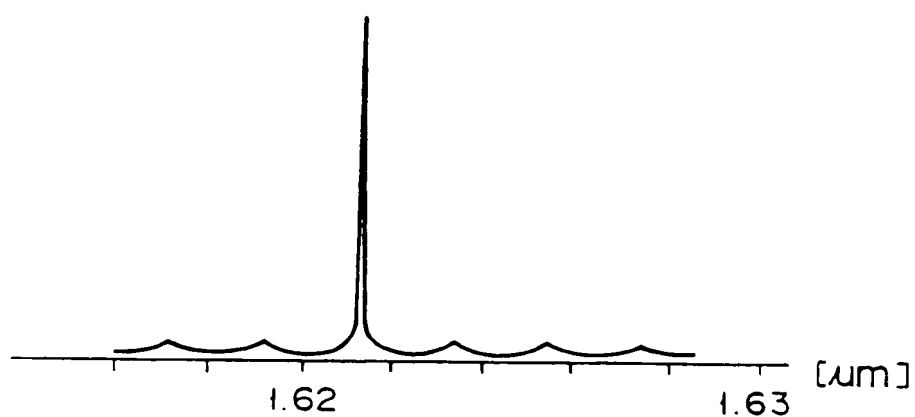


FIG. 4

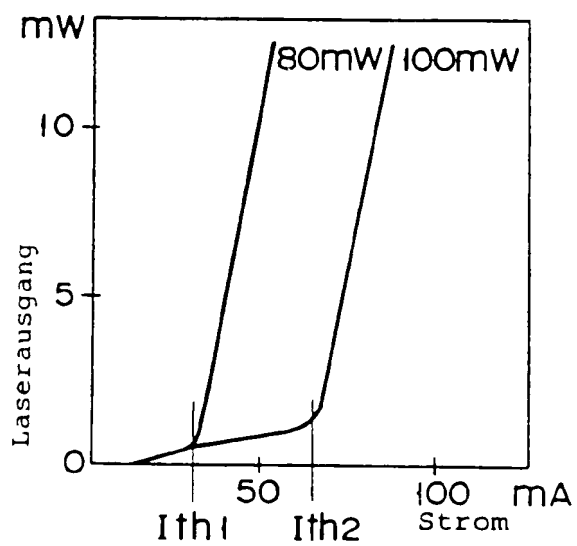


FIG. 5

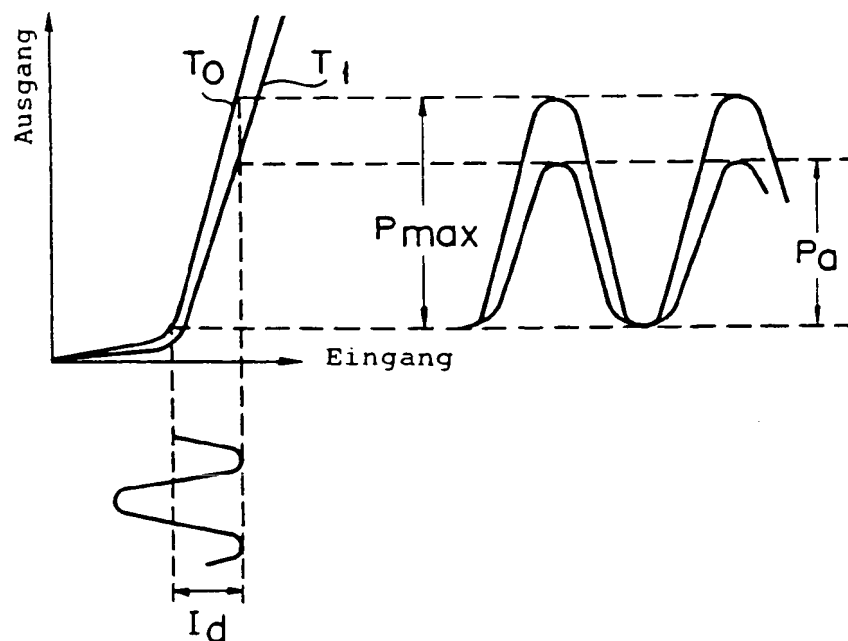


FIG. 6

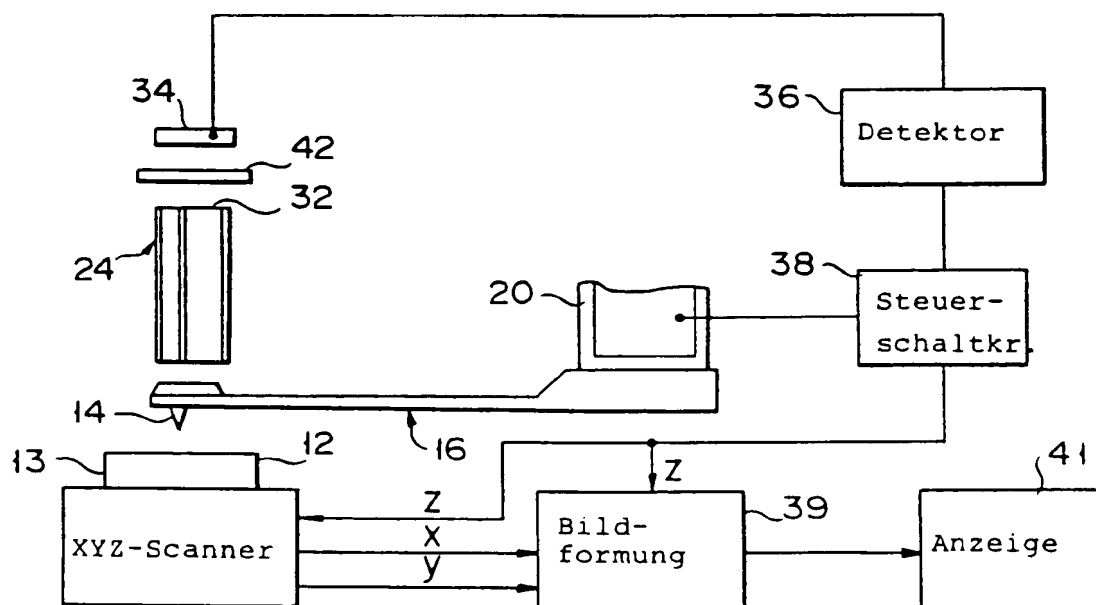


FIG. 7

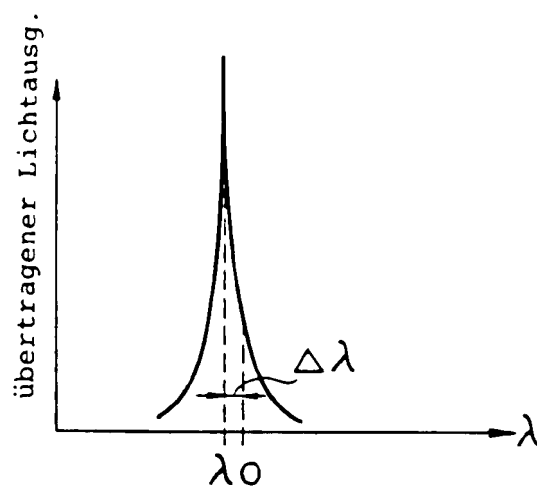


FIG. 8

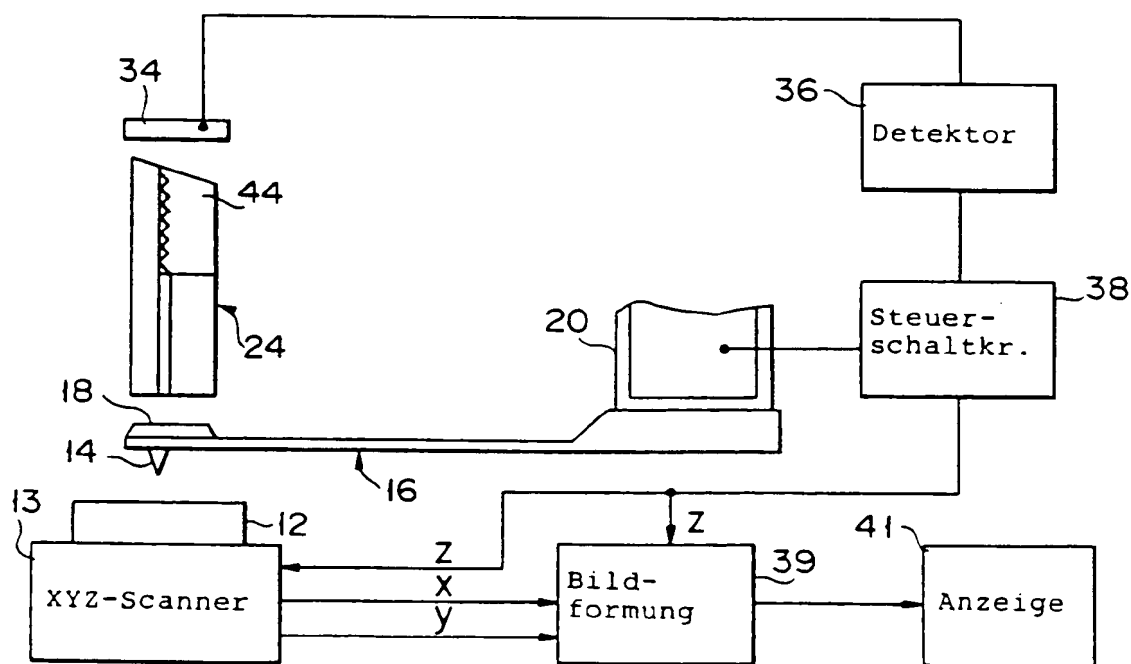


FIG. 9

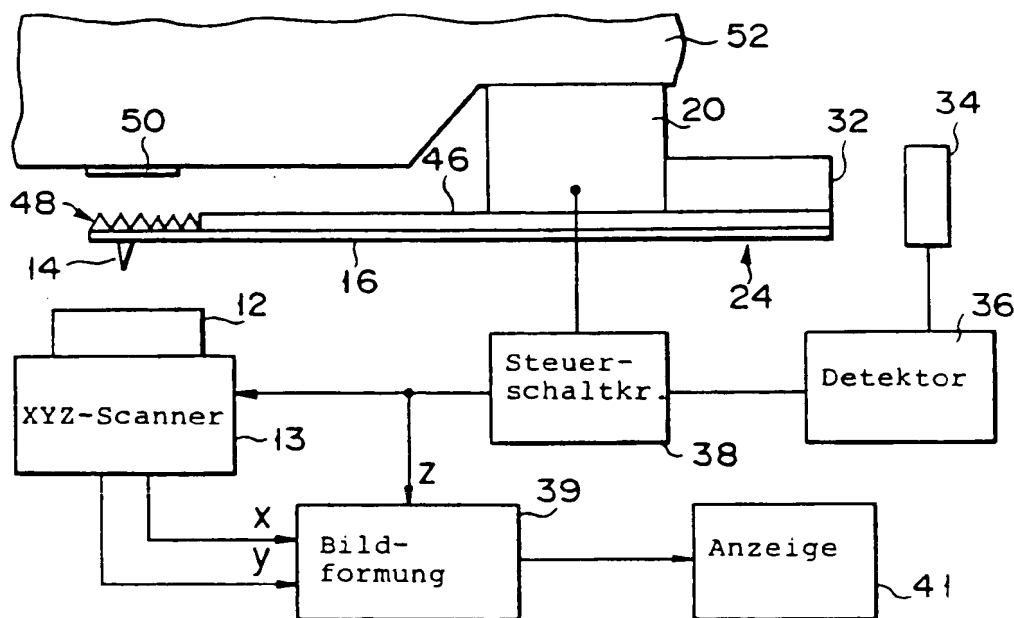


FIG. 10

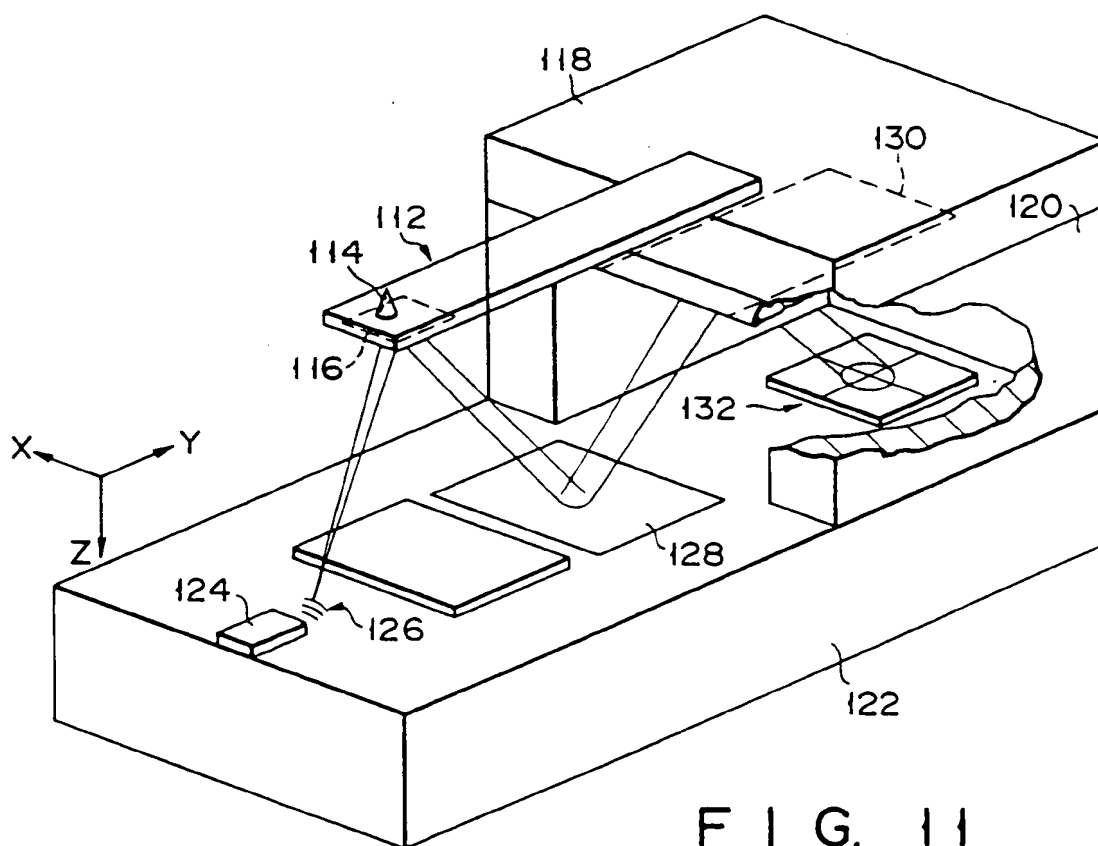


FIG. 11



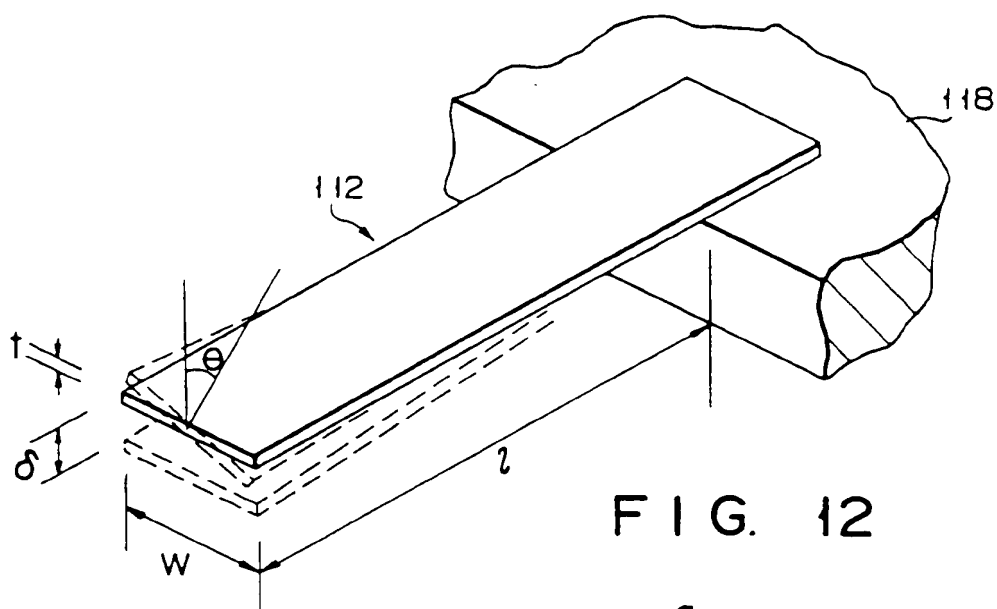
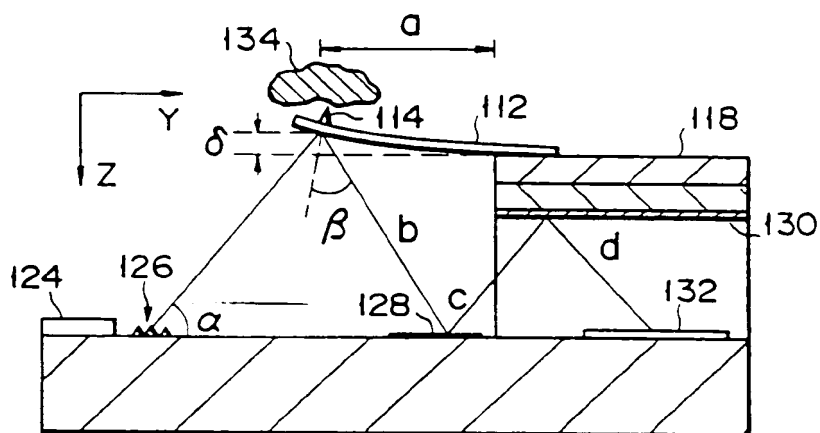
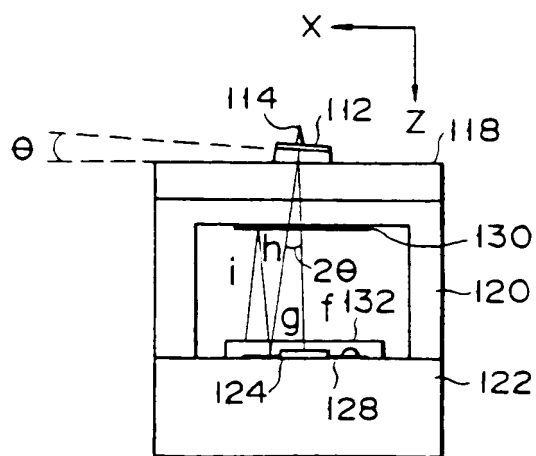


FIG. 12



F I G. 13



F I G. 14

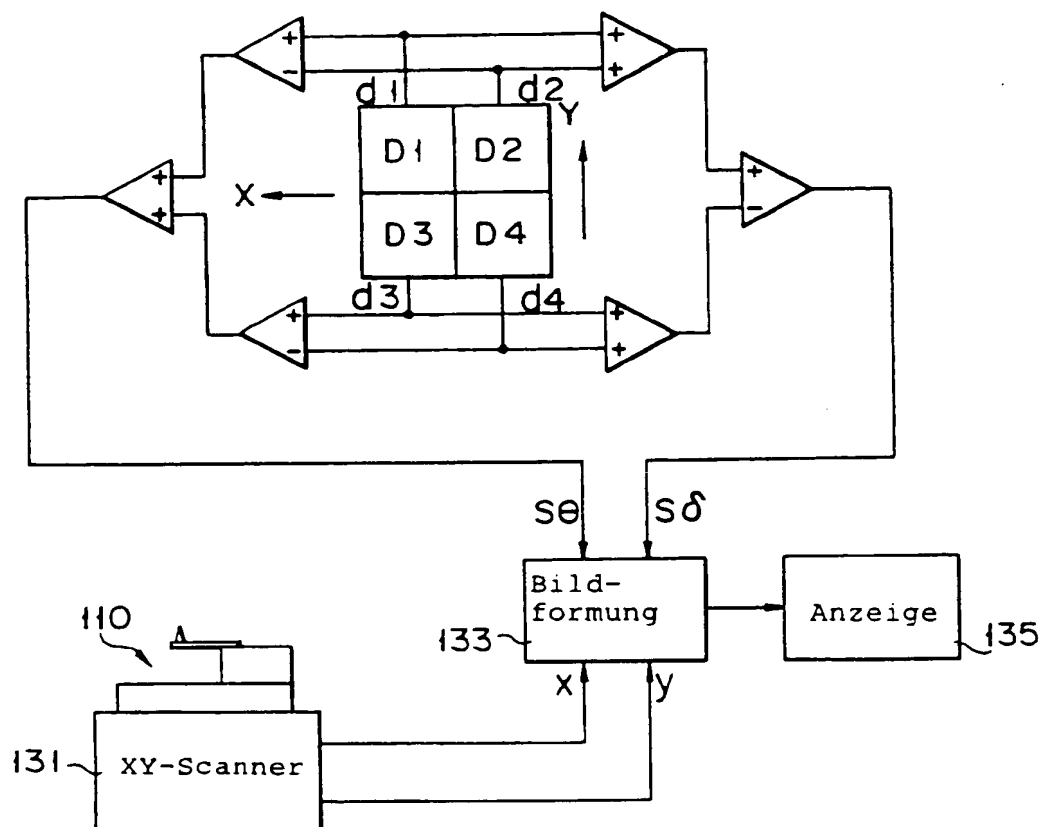


FIG. 15

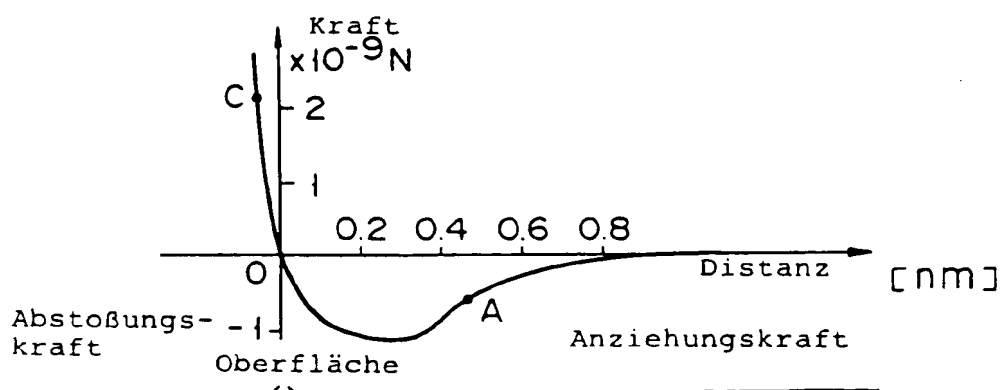


FIG. 16

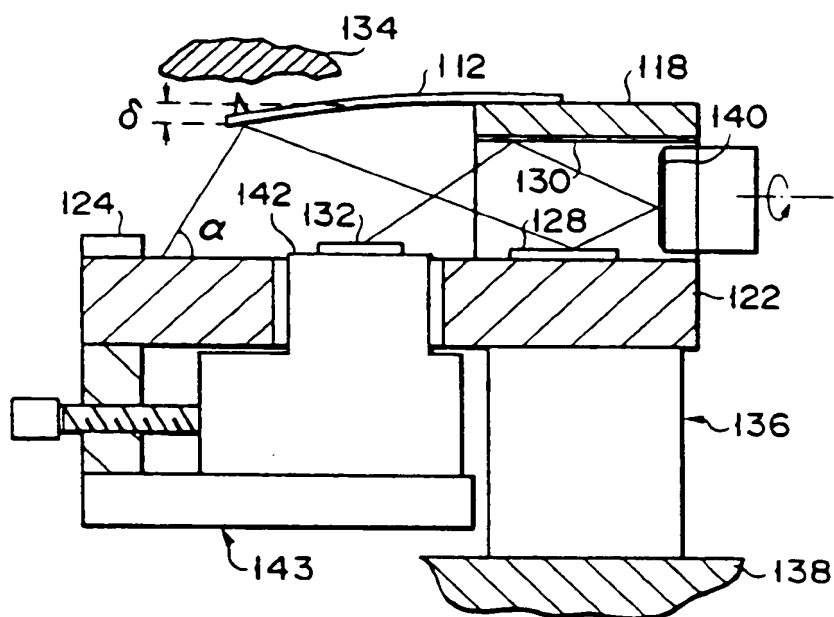


FIG. 17

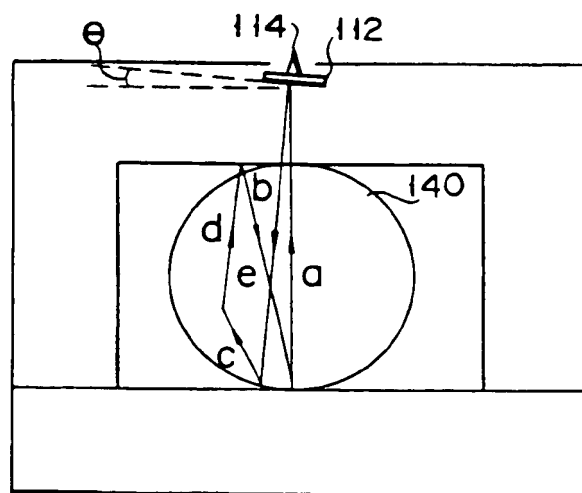


FIG. 18

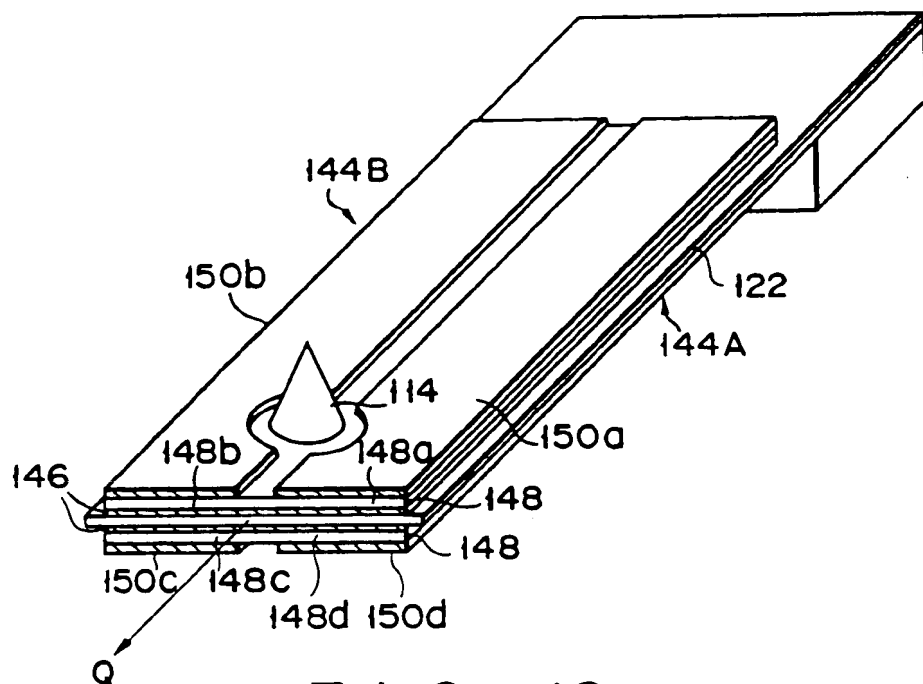


FIG. 19

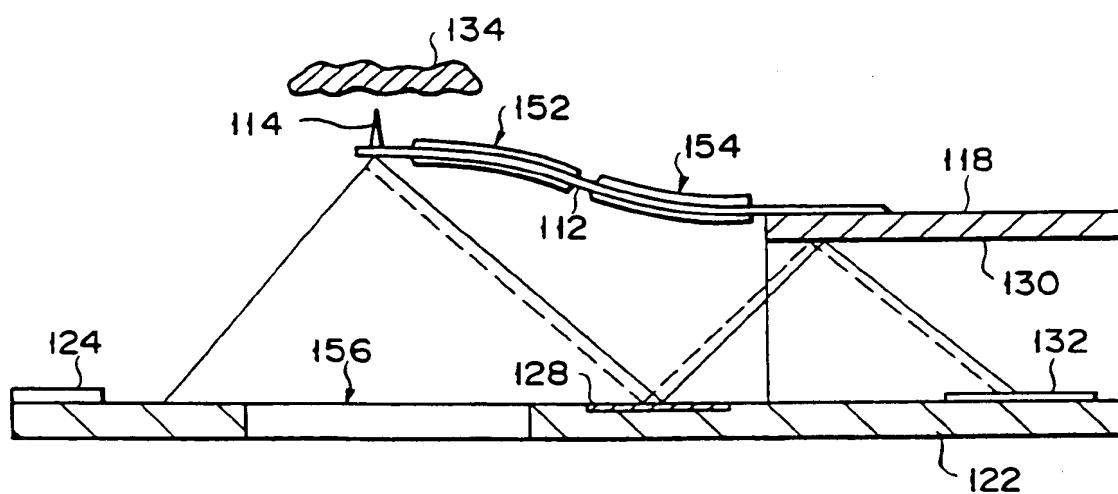


FIG. 20

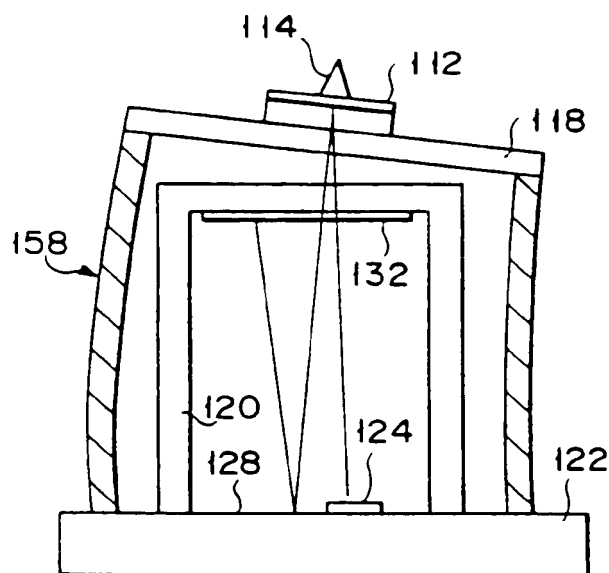


FIG. 21

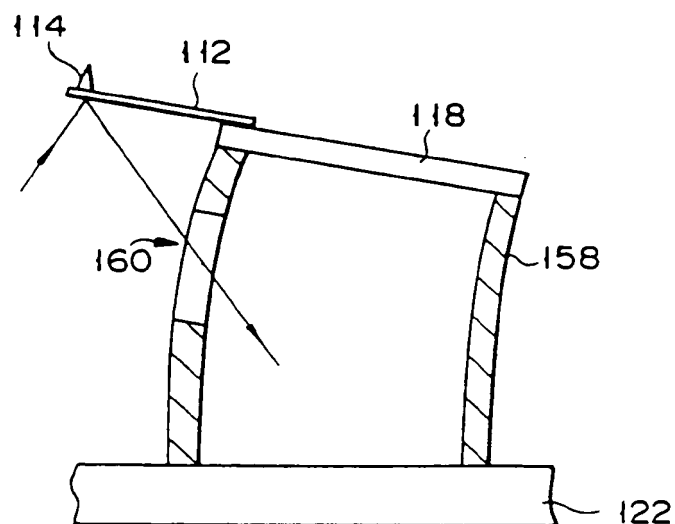


FIG. 22